PREVISÃO DE ESCORREGAMENTOS EM RODOVIAS A PARTIR DO USO DO MODELO SHALSTAB

Osmar Abílio de CARVALHO JÚNIOR [1]
Gabriella de Lima Freitas BLOISE [2]
Roberto Arnaldo Trancoso GOMES[3]
Verônica Moreira RAMOS[4]
Renato Fontes GUIMARÃES[5]

RESUMO

Os escorregamentos são fenômenos naturais que modelam a superfície terrestre e são potencializados pela ação antrópica, provocando prejuízos financeiros e vítimas fatais todos os anos. Em áreas tropicais, estes fenômenos são comuns principalmente durante fortes chuvas que acontecem freqüentemente no verão. No Brasil, vários escorregamentos catastróficos vêm acontecendo em diversas regiões, principalmente nas três últimas décadas, com grandes prejuízos financeiros e perdas de vidas. Entre as atividades humanas que propiciam grandes escorregamentos estão as construções de rodovias que provocam sérios impactos nos padrões de drenagem, pela concentração do escoamento superfical. Com o propósito de prever e mitigar os efeitos dos escorregamentos estão sendo desenvolvidos métodos que utilizam modelagem matemática. Dentre elas, destaca-se o modelo Shallow Stability (SHALSTAB) que tem obtido resultados satisfatórios para determinação de áreas susceptíveis a escorregamentos no oeste dos EUA e, mais recentemente, no Brasil. SHALSTAB combina um modelo hidrológico com um modelo de estabilidade de encosta. O modelo hidrológico reproduz a relação entre a concentração de água e a transmissividade do solo para determinar a condição de saturação. O modelo de estabilidade de encosta, baseado na teoria do talude infinito, simula o grau de estabilidade de uma determinada porção do solo localizada sobre a encosta. O presente trabalho possui como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para avaliar a susceptibilidade de escorregamentos em estradas utilizando o modelo SHALSTAB. A área de estudo são as bacias que drenam ao longo da rodovia BR-116, no trecho de Teresópolis-Além Paraíba, no estado do Rio de Janeiro. Inicialmente, foi confeccionado o Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de estudo, com resolução espacial de 10 metros, pelo método de interpolação TOPOGRID do software ArcInfo. O módulo Topogrid foi projetado para criar um modelo topográfico digital voltado para à hidrologia. Este módulo utiliza uma técnica de interpolação de interação por diferenças finitas, em que combina a eficiência de uma interpolação local (por exemplo, o método do Inverso do Quadrado da Distância), com métodos de interpolação global que utilizam uma superfície de continuidade, como o interpolador Kriging. A partir do MDT foi gerado mapas dos parâmetros morfométricos declividade e área de contribuição, e juntamente com valores de propriedades do solos pré-definidos foi aplicado o método SHALSTAB. Para analisar a eficiência do modelo foram coletados pontos de antigos e recentes escorregamentos e comparados com as zonas mais susceptíveis a escorregametos apontados pelo método. Os resultados obtidos mostraram que a topografia é um fator determinante para definição das áreas mais susceptíveis a escorregamentos. A delimitação das áreas susceptíveis ao escorregamento permite simular novos traçados para a rodovia de forma e evitar este fenômeno. A metodologia evidencia o potencial da modelagem matemática no planejamento e estratégias de manutenção de estradas.

[1] Universidade de Brasília, Professor Doutor, Pesquisador do CNPq, osmarjr@unb.br.
[2] Universidade de Brasília, gabriellabloise@bol.com.br
[3] Universidade Federal do Rio de Janeiro, ratgomes@ig.com.br
[4] Universidade de Brasília, vmramos@unb.br
[5] Universidade de Brasília, Professor Doutor, Pesquisador do CNPq, renatofg@unb.br

INTRODUÇÃO

Todos os anos ocorrem processos de deslizamentos, com mais ou menos intensidade, em muitos países. Esses deslizamentos são fenômenos deflagrados naturalmente, mas, atualmente, a ocupação desordenada nas encostas, além de outras atividades humanas, tem acelerado este processo potencializando seu poder destrutivo.

No Brasil, os processos de deslizamentos, a partir da década de sessenta, assumiram uma importância nos estudos científicos devido as intensas chuvas que atingiram o Rio de Janeiro em 1966 e 1967, (Meis & Silva, 1968; Barata, 1969; e Costa Nunes, 1969). A atenção dada a estes fenômenos ocorre porque a partir desta década a população, principalmente de baixa renda, começou a ocupar as encostas íngremes ao longo da Serra do Mar.

De acordo, com o Ministério das Cidades os escorregamentos são um dos principais processos geradores de risco sócio-ambientais no Brasil. A tabela 01 apresenta uma estatística realizada por este Ministério com o número de vítimas fatais causadas pelos escorregamentos nas encostas, entre os anos de 1988 até 2003, nos mais diferentes pontos do Brasil evidenciando a falta de ações mais eficazes na prevenção e controle desses fenômenos.

Tabela 1. Número de Mortos devido a escorregamentos em encostas.

Município	Estado	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Total
Petrópolis	RJ	171		1		6		10	3	6		2	1		45		13	258
Rio de Janeiro	RJ	68	9					13	7	64	4	2	1	3	5		1	177
Salvador	BA		31			11	4	14	54	33	10	4	15					176
São Paulo	SP		22		6	6	5	2	13	15	5	6	8	18		2		108
Recife	PE		8	10				5		37				4				64
Belo Horizonte	MG				2	10	5		14	3	9			4			16	63
Contagem	MG				2	36			2	1				6			10	57
Maceió	AL	21	12		1	4								5				43
Angra dos Reis	RJ													1		40		41
Teresópolis	RJ					7	2							4	1	15		29
Ouro Preto	MG		3			2			3	3	13							24
Timbé do Sul	SC								16									16
Ubatuba	SP	6								9								15
Blumenau	SC			14														14
Camaragibe	PE							6		6								12
Campos do Jordão	SP						1						1	9				11
Olinda	PE									7				4				11
São Bernardo do Campo	SP								2	3			5					10
Taboão da Serra	SP								3								7	10
Betim	MG								2	2	6							10
Cubatão	SP	10																10
Total de Mortos																		1159

Fonte Ministério das Cidades (2004).

Nas cidades os deslizamentos assumem, em geral, proporções catastróficas quando são feitas modificações na paisagem natural através de diferentes ações antrópicas (Silva Filho,

1992; Brunsden & Prior, 1984; Montgomery, 1994; Fernandes & Amaral, 1996; Larsen & Torres-Sánchez, 1998; entre outros). Dentre essas diversas intervenções humanas destaca-se a construção de estradas que modificam as condições naturais da paisagem em que estão inseridas, através da alteração do padrão de drenagem da área, de cortes na encosta, retirada de vegetação, entre outros. Várias são as conseqüências dos impactos causados pelos processos de deslizamentos nas estradas, como exemplo, os gastos necessários com as obras de contenção e reconstituição da rodovia, o prejuízo causado pelo período de interdição e o mais grave de todos a perda de vidas humanas.

Para solucionar este problema, metodologias preventivas vêm sendo desenvolvidas através do uso de modelos matemáticos baseados em dados físicos. Dentro desta linha, vêm se destacando as metodologias que combinam modelos baseados em processos e mecanismos, que seguem as leis inerentes da natureza, com os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que possibilitam o tratamento e análise dos dados de forma espacializada e em diferentes escalas.

De acordo com Dietrich & Montgomery, (1998) e Christofoletti, (1999) a integração de modelos matemáticos, baseados nas leis naturais, com os SIG,s pode diminuir a subjetividade na análise, contribuindo com grande capacidade de uso para estimar as áreas mais susceptíveis aos deslizamentos em uma paisagem.

Dessa forma, a metodologia de predição dos fenômenos naturais, através da modelagem matemática, possibilita elaborar medidas de prevenção e obras de contenção mais eficazes, tornando-se uma importante ferramenta de apoio a decisão aos gestores e técnicos para um melhor planejamento e na construção de pequenas a grandes obras, como as estradas, oleodutos, gasodutos, e outras.

Considerando o exposto, este trabalho tem como objetivo geral aplicar o modelo matemático SHALSTAB, que combina um modelo hidrológico com um modelo de estabilidade de encosta. para identificação de áreas críticas a escorregamentos rasos de forma a auxiliar o planejamento de traçado e manutenção de estradas.

IMPACTOS DAS RODOVIAS PARA A OCORRÊNCIA DOS DESLIZAMENTOS

As rodovias quando mal concebidas estão entre os maiores abusos cometidos sobre o meio ambiente. Em nome do desenvolvimento foram construídas rodovias sem o devido planejamento e o cuidado com seus impactos. Essas rodovias vêm intensificando a destruição ambiental aumentando a pobreza, particularmente em florestas tropicais de todo o mundo (Goodland, 1989).

A seleção dos traçados das primeiras rodovias, mesmo projetadas através de métodos da engenharia moderna, considerava apenas os aspectos geométricos e geotécnicos, baseados no mínimo custo para a construção tendo um relativo retorno financeiro dos investimentos (Lisboa, 2002). Esta escolha somada ao descontrole do uso e ocupação do solo resultou em graves conseqüências ao meio ambiente em todo o mundo, principalmente nas áreas lindeiras às rodovias.

Somente a partir dos anos 70, a preocupação com o meio ambiente e com o bem estar da população lindeira passou a fazer parte dos processos de planejamento rodoviário nos países desenvolvidos. Os E.U.A, em 1969, criaram o Conselho de Qualidade Ambiental que exige a preparação de uma Avaliação de Impacto Ambiental para os empreendimentos com grande potencial de impacto ao meio ambiente, dentre os quais se destacam as rodovias. No Brasil a preocupação com o meio ambiente foi incorporada lentamente a partir da Conferência Mundial sobre o Meio Ambiente, realizada em Estocolmo, no ano de 1972, com a implantação de políticas e princípios na forma de uma legislação especifica que estabelece as diretrizes básicas do licenciamento ambiental (Reis, 1999).

Entretanto, a preocupação em se adotar medidas de gestão ambiental no setor de transportes brasileiro começou a ser estudada e implantada há dois anos, através da criação da Política Ambiental do Ministério dos Transportes (Ministério dos Transportes, 2002), que propõe diretrizes ambientais para atuação do Ministério, da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ).

Uma das principais ações das Agências de Transportes, de acordo com McCormack (2001), nos países desenvolvidos, é considerar os impactos ambientais nos processos de planejamento e gerenciamento de rodovias. Situação diferente dos países em desenvolvimento que tem como ações prioritárias à redução da miséria, o desenvolvimento econômico e a expansão da infra-estrutura de transporte.

Os países em desenvolvimento precisam de recursos financeiros externos para expandir seu setor de infra-estrutura de transporte, particularmente a implantação de novas rodovias, daí a exigência com o cuidado ambiental se torna garantido quando agências de financiamento dos países ricos estipulam restrições ambientais e sociais, para fornecer os recursos financeiros solicitados.

Dentro deste contexto, vários trabalhos vencendo realizados com intuito de auxiliar no planejamento de traçado de rodovias e também mitigar os impactos causados, principalmente pelos deslizamentos de terra de rodovias já implantadas.

Fredriksen, (1970), comparando os deslizamentos e as taxas de sedimentos em três bacias de drenagem, demonstrou que a derrubada de árvores para construção de rodovias pode aumentar o volume de sedimentos nas áreas de drenagem de duas a 150 (cento e cinqüenta) vezes. Além disso, conclui que os deslizamentos associados às rodovias em áreas de matas movimentam um maior volume de solo e que estes deslizamentos ocorrem freqüentemente onde as estradas atravessavam ou cruzavam os canais dos córregos e rios.

Larsen & Parks, (1997), utilizaram o Sistema de Informação Geográfica para determinar o grau de associação entre a presença de estradas e a freqüência de deslizamentos em terrenos montanhosos, em Porto Rico. Os resultados demonstraram que impactos ambientais das estradas podem ser maiores do que aquilo que comumente se percebe.

As modificações nos taludes naturais através de cortes nas estradas podem aumentar o número de deslizamentos. Isto pode ser constatado por Silva Filho (1992), que confirmou que dos acidentes ocorridos, em 1988 ao longo da Estrada Dona Castorina e Vista Chinesa, no maciço da Tijuca, cidade do Rio de Janeiro, 65% foi devido a ruptura a partir do contato entre o asfalto e a continuidade da vertente, no seu sentido a jusante, enquanto 33% ocorreram acima da estrada, ou seja, os acidentes tiveram influência da própria estrada.

Montgomery (1994) aplicou a modelagem matemática para testar, em três bacias de drenagem do oeste americano, a relação entre a formação inicial dos canais e os escorregamentos rasos com a inclinação da encosta e o princípio da área de contribuição e concluiu que, a concentração de drenagem nas áreas com estradas aumentaram a profundidade efetiva das redes de canais e influenciaram fortemente a distribuição dos processos erosivos.

A estabilização de uma encosta é um processo caro e dispendioso, às vezes o seu custo pode ultrapassar o custo das obras ameaçadas ou atingir valores proibitivos. Conseqüentemente esforços no sentido de utilizar uma metodologia que possa definir na paisagem os locais mais susceptíveis a ocorrência de deslizamentos torna-se fundamental para fins de planejamento já que a melhor alternativa consiste em adotar medidas preventivas e não curativas.

MODELO DE CONTROLE TOPOGRÁFICO SOBRE ESCORREGAMENTO RASO (SHALSTAB)

Dietrich e Montgomery (1998), partindo do princípio de que a maioria dos escorregamentos de terra ocorre em áreas que apresentam declividades elevadas, formas de relevo convergentes e ausência de canais, desenvolveram um modelo matemático a partir de bases físicas (modelo SHALSTAB), que relaciona a instabilidade da encosta à topografia local. Esse modelo prevê que as zonas íngremes divergentes, próximas aos divisores de água, são instáveis, entretanto, necessitam de grandes tempestades para ocasionar o processo de deslizamento. Por outro lado, as zonas íngremes convergentes não canalizadas necessitam de pequenas quantidades de chuvas para ocasionar aquele processo, sendo, portanto, mais susceptíveis à ocorrência de deslizamentos que as zonas de topografias divergentes.

O modelo SHALSTAB, resulta da combinação de um modelo de estabilidade de encosta com um modelo hidrológico, desenvolvidos a partir de um modelo digital de terreno, e determina as zonas susceptíveis a escorregamentos rasos para cada célula da grade. O seu desempenho depende basicamente da resolução e confiabilidade do modelo digital de terreno e da qualidade dos dados relativos aos parâmetros físicos do solo.

O modelo de estabilidade de encosta, se baseia na teoria do talude infinito e é expresso em função da razão **h/z** que é a proporção da coluna de solo que está saturada na instabilidade (Equação 1).

$$\frac{h}{z} = \frac{C'}{\rho_w g\, z \cos^2\theta \tan\phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w}\left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \qquad (1)$$

Onde h representa o nível da coluna de água no subsolo acima do plano de ruptura (m); z representa a espessura do solo (m), g é a aceleração da gravidade (m/s2), ρs e ρw correspondem respectivamente às densidade do solo e da água (kg/m3) C' representa a coesão efetiva (kpa), ϕ é o ângulo de atrito interno (graus) e θ a declividade.

Para o controle da razão h/z no modelo hidrológico usado pelo SHALSTAB, os autores basearam-se no trabalho desenvolvido por O'Loughlin (1986) (Equação 2). Esse modelo simula, para um estado de equilíbrio hidrológico, o padrão espacial de umidade relativa fixa (h/z) durante uma chuva, ou seja, a relação entre a concentração e a transmissão de água no solo, determinando, assim, os locais de saturação na encosta.

$$\frac{h}{z} = \frac{Q}{T}\frac{a}{b\,sen\theta} \qquad (2)$$

Onde a é a área de contribuição a montante (m^2), b é o comprimento através do qual o fluxo é considerado (m), T é a transmissividade do solo (m^2/dia), Q é a precipitação (mm) e θ é a declividade local (graus).

Na aplicação desse modelo a profundidade do canal e o fluxo na rocha deverão ser desprezados. O padrão de h/z para uma determinada chuva é definido a partir da relação hidrológica Q/T e da relação topográfica (a/b)senθ. A primeira representa a magnitude da precipitação (Q) correspondente à capacidade de transmissividade (T) de água do solo à jusante. Assim, quanto maior o valor de Q relativo a T maior será a capacidade de saturação do solo e, conseqüentemente, de instabilidade na encosta. Já a segunda representa o acúmulo de fluxo em uma determinada área. O efeito da topografia convergente e a elevação da poro-pressão são expressos a partir da razão a/b, a qual demonstra que grandes áreas de contribuição correspondem a elevados valores de saturação (h/z).

Desta forma, combinando-se o modelo de estabilidade de encosta com o modelo hidrológico, que correspondem respectivamente às Equações 1 e 2, obtém-se a Equação 3.

Esta equação determina os locais mais susceptíveis a ocorrência de escorregamentos rasos a partir da relação entre a precipitação efetiva e a transmissividade do solo, podendo ser simplificado quando não for considerada a coesão do solo (Equação 4)

$$\frac{}{} = \frac{}{} + \frac{}{}\left(- \frac{}{} \right) \qquad (3)$$

$$\frac{}{} = \frac{}{( )}\left[\frac{}{}\left(- \frac{}{} \right) \right] \qquad (4)$$

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, como pode ser visto na figura 1, é uma região de pequenas bacias hidrográficas que drenam em direção a Rodovia Federal, BR-116 Trecho Rio –Teresópolis – Além Paraíba localizada a oeste da Baia de Guanabara, no Estado do Rio de Janeiro, e que apresenta Quatro Unidades de Conservação. A escolha dessa região se deve aos constantes e freqüentes escorregamentos pela qual vem sofrendo nos últimos anos e pela proposta de uma ampliação daquela rodovia justamente num trecho considerado sensível com a presença do Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO), criado em 30 de novembro de 1939, o qual conserva até hoje suas características naturais.

Figura 1– Mapa de Localização da área de estudo no Estado do Rio de Janeiro.

O objeto deste estudo pertence à BR-116/RJ e está compreendido entre os municípios de Magé, Guapimirim e Teresópolis no Estado do Rio de Janeiro. É uma região que tem seu relevo com variações altimétricas desde 200 metros de altitude até 2200m. Desta forma, seu relevo é muito irregular e bastante movimentado.

A rodovia é conhecida por Rodovia Rio-Teresópolis-Além Paraíba e está dividida em três subtrechos, porém o trecho de interesse para este trabalho começa no km 89,6 (acesso principal a Teresópolis) e vai até o km 104, nesse trecho localiza-se a Serra de Teresópolis com quatorze quilômetros e quatrocentos metros de extensão em pista única e mão dupla de circulação com acostamento em alguns pontos.

Esta rodovia possui uma grande importância sócio-econômica, pois é uma das rodovias que ocorre o transporte e o escoamento de cargas da região Sudeste para a região Nordeste do Brasil. Além disso, produtos petroquímicos, provenientes ou não da Refinaria localizada em Duque de Caxias – REDUC, chegam até o Nordeste e parte leste de Minas Gerais também por essa via que dá acesso à região serrana de Teresópolis, Friburgo e arredores, cidades que pelas suas características naturais, ainda preservadas, e com um clima agradável são muito procuradas para o lazer.

O uso do solo na área de estudo, de acordo com o último Censo Agropecuário em 1996, pode ser classificado em ocupação por pastagens (naturais e artificiais), por matas (naturais e plantadas), por lavouras (permanentes e temporárias) e por lavouras (em descanso e produtivas não utilizadas). Cabe destacar que, assim como em grandes regiões metropolitanas, existem muitas ocupações irregulares em encostas, nas cidades de Guapimirim e Teresópolis que a qualquer momento correm o risco de deslizar.

No município de Guapimirim grande parte das terras é ocupada por vegetação (59,6%), trecho onde se localizam o PARNASO e outras Áreas de Preservação Ambiental que ainda se encontram conservadas, mas que já está sofrendo com a especulação imobiliária que provoca a ocupação desordenada do solo (16,8%) seguida da pastagem (15,7%).

Finalmente em Teresópolis, de acordo com a EPIA (2003), as áreas cobertas por vegetação representam a principal forma de uso de solo, constituindo 47,3% da área total mapeada. As pastagens vêm em segundo lugar com 32,9%, seguida pelo uso urbano com 10,6%, lembrando que esse uso corresponde à área de Influência Direta da rodovia BR-116.

APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB

Serão descritos a seguir os procedimentos desenvolvidos para a aplicação do modelo de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos nas encostas (SHALSTAB) nas bacias que drenam a Rodovia BR-116, Trecho Rio-Teresópolis nos municípios de Magé, Guapimirim, Teresópolis e Petrópolis, no estado do Rio de Janeiro.

Geração do Modelo Digital de Terreno

O modelo digital de terreno (MDT) é um componente fundamental no modelo de predição de escorregamentos rasos, pois está direta ou indiretamente relacionado aos parâmetros morfológicos como declividade (θ) e área de contribuição (a/b). Desta forma, gerou-se um MDT para a área de estudo a partir de quatro cartas topográficas (digitais) na escala de 1:50.000 com uma resolução de 10 metros. As cartas digitais utilizadas foram elaboradas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE.

A elaboração do MDT foi feita através da topografia da área de estudo a partir da utilização do módulo TOPOGRID do software ArcInfo (ESRI, 1993), que foi desenvolvido para gerar um modelo topográfico digital voltado para a hidrologia. Os dados referentes aos pontos cotados, hidrografia e altimetria foram editados previamente para serem utilizados no processo de interpolação.

O MDT elaborado foi importado para o ambiente ArcView onde foi removido os ruídos gerados pelo interpolador que podem influenciar a direção do fluxo de água e gerar erros no cálculo do fluxo acumulado e na definição das áreas de susceptibilidade a escorregamentos rasos. Desta forma, esse procedimento tornou apropriado o MDT para a aplicação hidrológica.

Obtenção dos Parâmetros Morfológicos e Parâmetros de Propriedades dos Solos

Os parâmetros do solo utilizados no modelo SHALSTAB foram somente os valores de ângulo de atrito interno (ϕ) e densidade aparente (ρs). Isto ocorreu devido à falta dos outros dados de solos, utilizados no modelo, de forma espacializada, deste modo, optou-se por gerar o modelo SHALSTAB sem considerar a coesão do solo. Entretanto, a ausência dos valores de coesão do solo não prejudica os resultados, pois de acordo com Guimarães et al (2003), esta combinação apresentou um dos melhores resultados em comparação com o modelo considerando a coesão. Assim, foram utilizados valores de 45º para o ângulo de atrito e de 2,00 g/cm ³ para o peso específico. Estes valores foram retirados de bibliografia em áreas semelhantes com a estudada (De Campos et al., 1997; De Campos et al., 1992; De Ploey e Cruz, 1979).

Identificação das Áreas Susceptíveis a Escorregamentos Rasos Através do Modelo Shalstab

O modelo SHALSTAB é um algoritmo produzido para rodar em linguagem AML (ArcInfo Macro Language) no software ARCINFO, e recentemente, foi também desenvolvido em linguagem Avenue para rodar em ambiente ARCVIEW, em que, a partir de um modelo digital de terreno combinado com um modelo hidrológico e um modelo de estabilidade de encosta, determinam-se as zonas potenciais de susceptibilidade a escorregamentos rasos para cada pixel de uma área. Desta forma, após a realização de todos os procedimentos descritos anteriormente foi determinada, a partir da aplicação da rotina SHALSTAB na área de estudo, a razão Q/T, isto é, a relação entre a precipitação efetiva e a transmissividade no solo, necessária para causar instabilidade.

Validação do Modelo de Previsão SHALSTAB

A validação do modelo foi feita qualitativamente, pois não foi possível obter fotos aéreas da área de estudo, assim, foram coletados pontos de antigos e recentes escorregamentos a partir de análise em campo e verificado no mapa de susceptibilidade a classe que se encontra tal escorregamento. Desta forma, a localização desses pontos foi feita através da coleta de 31 amostras utilizando um GPS (Global Position System) de mão. Estes pontos foram coletados a partir do datum WGS 84 e depois foram convertidos para o datum SAD 69 que é o mesmo das cartas utilizadas.

RESULTADOS

Serão apresentados nesta etapa os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita anteriormente para geração do modelo digital de terreno, mapa de declividade e mapa de área de contribuição. Além disso, será feita uma análise sobre a eficiência e o desempenho do modelo de previsão de escorregamento raso.

Modelo Digital de Terreno (MDT)

A figura 2 mostra o mosaico das cartas de 1:50.000 utilizado para a geração do MDT e a figura 3 mostra este modelo em 3 dimensões. Observa-se que a topografia da área de estudo possui cotas altimétricas que variam de 20 à 2200 metros, com relevo bastante diversificado, podendo ser dividido em áreas de baixadas e colinas com cotas que oscilam até 200 metros de altitude e relevo dissecado em morros entremeados por planícies colúvio-aluvionares, apresentando vertentes retilíneas com topos aguçados ou convexas com os topos arredondados. Após os 200 metros de altitude, surge a Serra dos Órgãos onde predominam as formas de relevos de morros e montanhosos com cotas que chegam a atingir valores acima de 1600 metros. Os relevos de morros apresentam vertentes convexas a côncavas com os topos arredondados e cristas assimétricas, ocorrendo depósitos coluviais e de tálus, bem conhecido pelos geomorfólogos como mar de morros, e os relevos montanhosos apresentam vertentes retilíneas a côncavas, onde aparece o pico Dedo de Deus, e o padrão de drenagem nas duas formas de relevo varia entre dendrítico, treliça ou

retangular. Pode-se observar, também, o relevo escarpado formando os paredões rochosos que oscilam entre 500 metros podendo ultrapassar os 2200 metros de altitude, sendo por isso, muito acidentados com vertentes bastantes íngremes e uma densidade de drenagem alta.

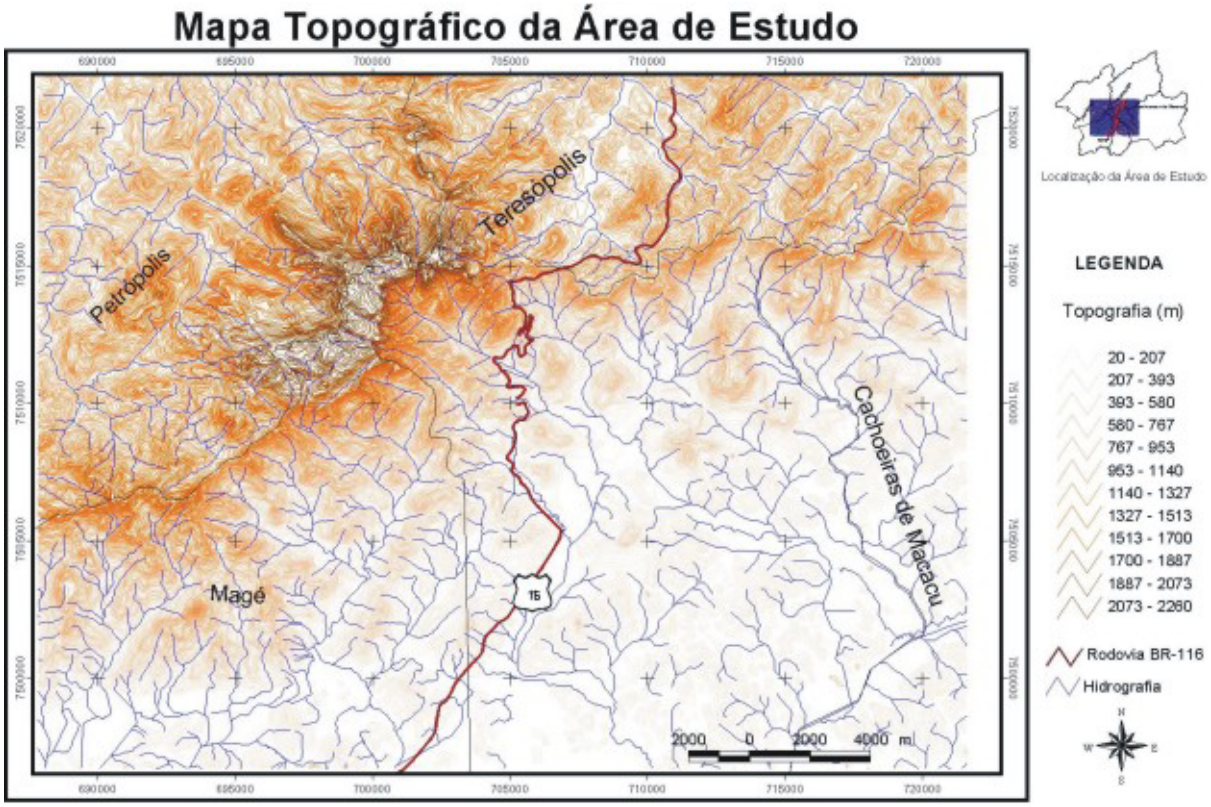

Figura 2 – Mosaico das 4 cartas de 1:50.000

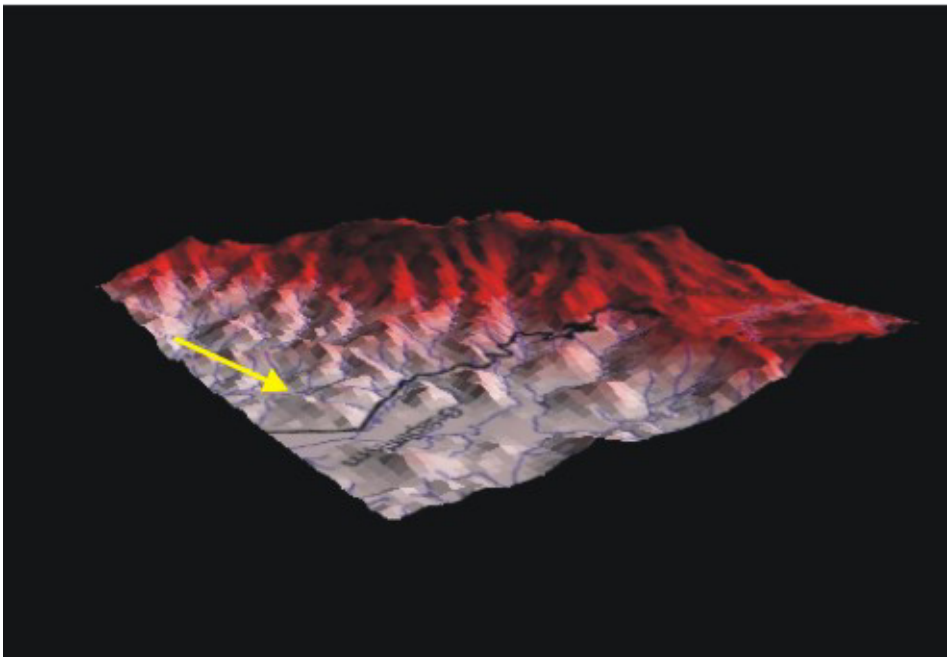

Figura 3 – Modelo Digital de Terreno da Área de Estudo com a rodovia BR-116 (linha em cor preta).

Mapa de Declividade

A figura 4 mostra as declividades divididas em 8 classes representativas em que, variam desde 0% a mais de 100% de declividade. Nota-se que, as classes de menor declividade apresentam-se na área de baixada da área de estudo (parte inferior da figura), principalmente na região de Guapimirim. Entretanto, estas declividades vão aumentando em direção da região serrana. As maiores declividades apresentam-se na área de cumieira da Serra do Mar, onde muitos dos paredões rochosos característicos desta região estão localizados.

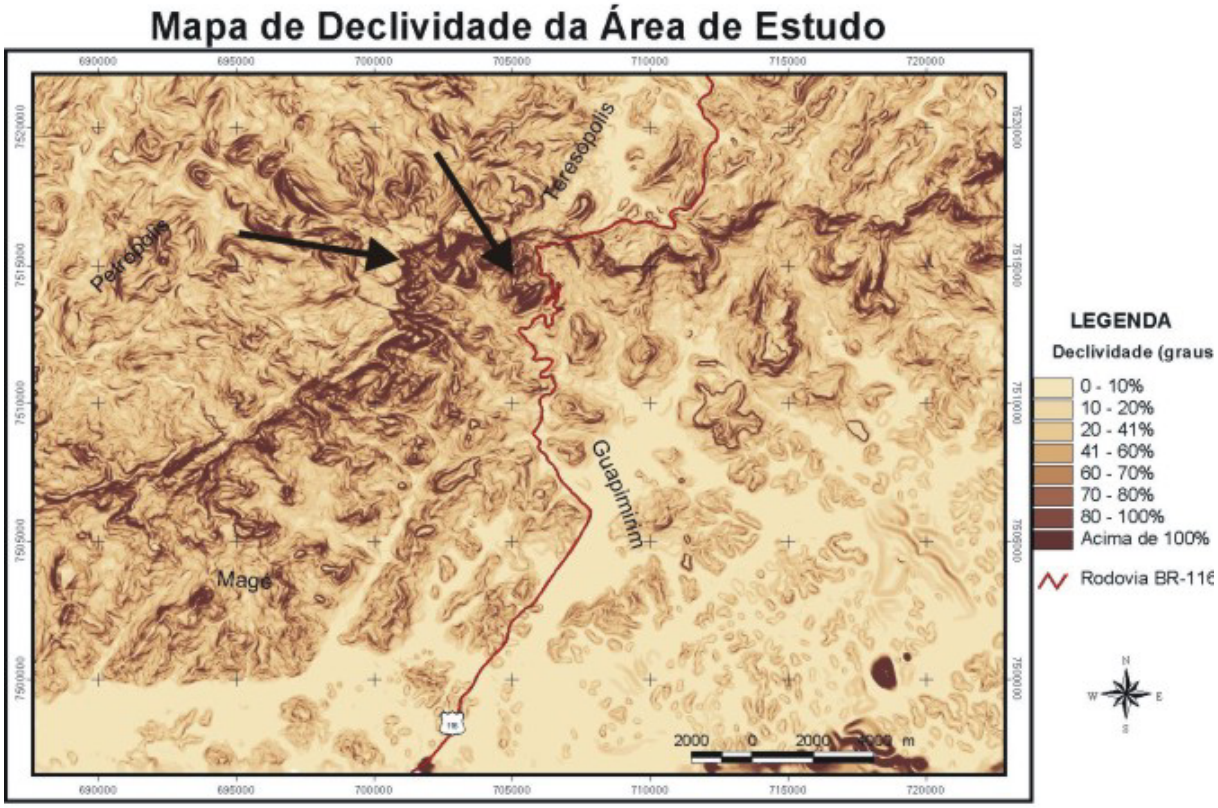

Figura 4 – Trajeto da rodovia sobreposto ao mapa de declividade.

Mapa de Área de Contribuição

A figura 5 mostra o mapa de área de contribuição (a/b). Este mapa foi gerado em ambiente ArcView e apresenta 9 classes com valores que variam de 0 a mais de 4.000 pixels. Objetivando uma melhor visualização dos resultados dividiu-se esses valores em 9 classes de áreas de contribuição. Comparando esse mapa com o MDT (Figura 3) e com o mapa de declividade (Figura 4) verifica-se um aumento gradativo da área de contribuição em direção às porções do relevo que apresentam os menores índices altimétricos (porções côncavas do relevo). Por outro lado, as classes de menor contribuição são observadas nas porções do relevo que apresentam declividades elevadas.

Mapa de Áreas Susceptíveis aos Escorregamentos Rasos

O mapa de áreas susceptíveis aos escorregamentos rasos foi obtido através do modelo SHALSTAB (Montgomery e Dietrich, 1994) sem considerar a coesão do solo. Entretanto para compensar essa ausência foi utilizado um alto valor de ângulo de atrito de 45 º e de densidade aparente de 2,0g/cm³ constantes para toda a área de estudo.

Dessa forma, o mapa de áreas susceptíveis aos escorregamentos (Figura 6) apresenta as classes de estabilidade geradas para a área de estudo a partir da razão Q/T. Pode-se verificar que as classes de estabilidade vão desde a incondicionalmente instável, que é

representada pela cor vermelha forte, até a incondicionalmente estável, representada pela cor azul claro, e apresenta, ainda, uma gradação intermediária entre as classes.

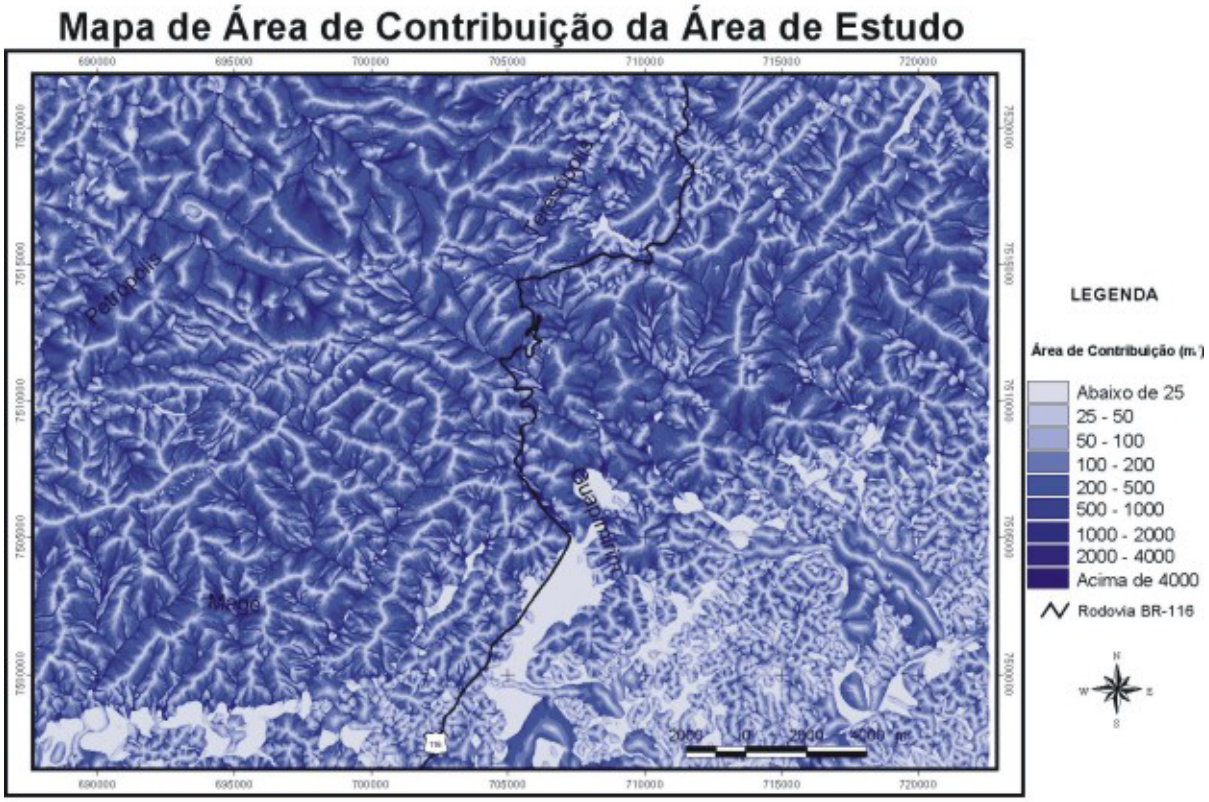

Figura 5 - Mapa de área de Contribuição.

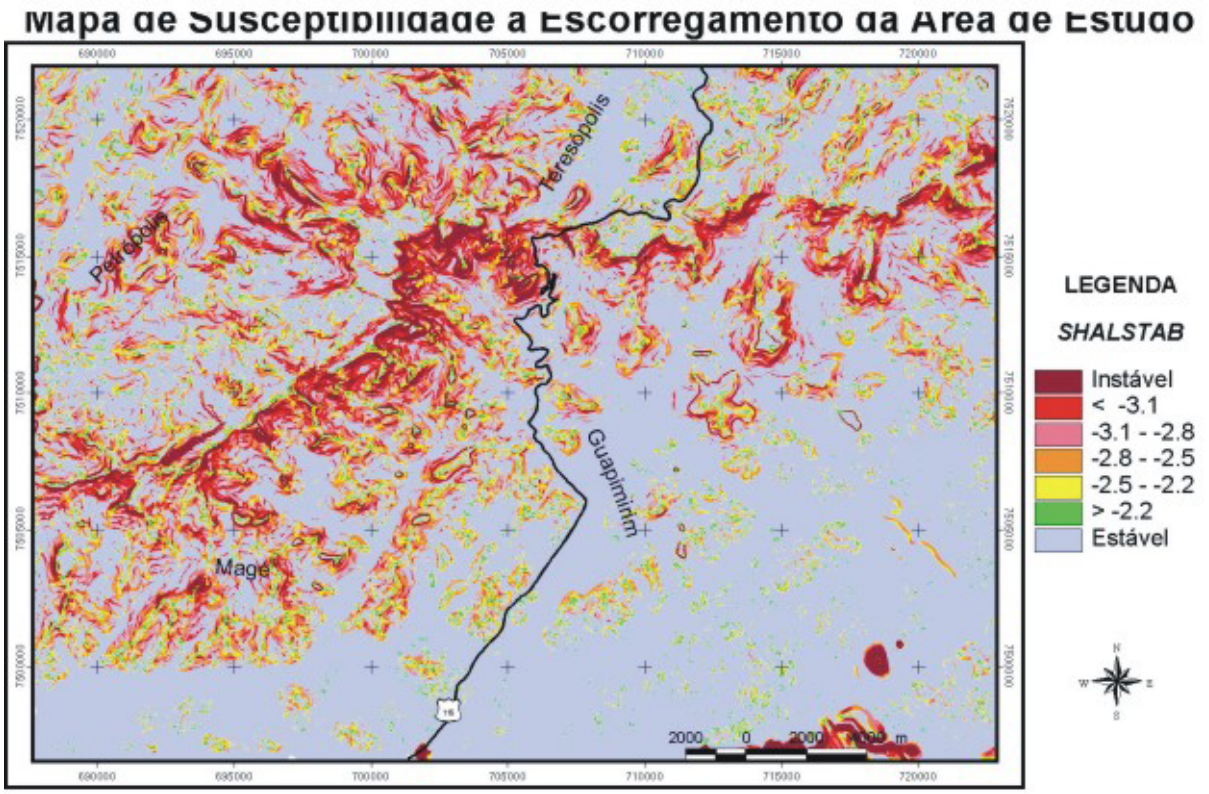

Figura 6 – Mapa de Áreas Susceptíveis a Escorregamentos Rasos.

Pode-se constatar que, de acordo com o mapa de declividade e com o MDT, na classe incondicionalmente instável se localizam os paredões rochosos e os divisores de drenagem que possuem declividades quase verticais, bastante íngremes, enquanto na classe incondicionalmente estável se localizam as áreas com baixas declividades. Assim, respectivamente, as áreas incondicionalmente instáveis são as que apresentam maiores susceptibilidades aos escorregamentos, mesmo que não estejam completamente saturadas, e as áreas incondicionalmente estáveis são as que não ocorrem escorregamentos.

Análise da eficiência do modelo de previsão

Devido à inexistência de cicatrizes de escorregamentos na área de estudo, foi feita uma análise qualitativa do modelo de previsão de escorregamentos rasos. Desse modo, para avaliar a eficiência do modelo SHALSTAB foram coletados pontos antigos e recentes de escorregamentos ao longo da rodovia BR-116, entre os municípios de Guapimirim e Teresópolis até a altura do km 82.

Ao analisar o mapa de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos com os pontos coletados (Figura 7), pode-se afirmar que o modelo apresentou um bom desempenho, pois a maioria dos pontos indicados se localizam justamente nas áreas em que estão propícias aos escorregamentos representados no mapa pela cor vermelha. Pode-se concluir que o bom resultado do modelo se dá em função do modo como foi produzido o modelo digital de terreno, pois os deslizamentos são fortemente controlados pela topografia. Quanto mais preciso o MDT melhor será o desempenho do modelo.

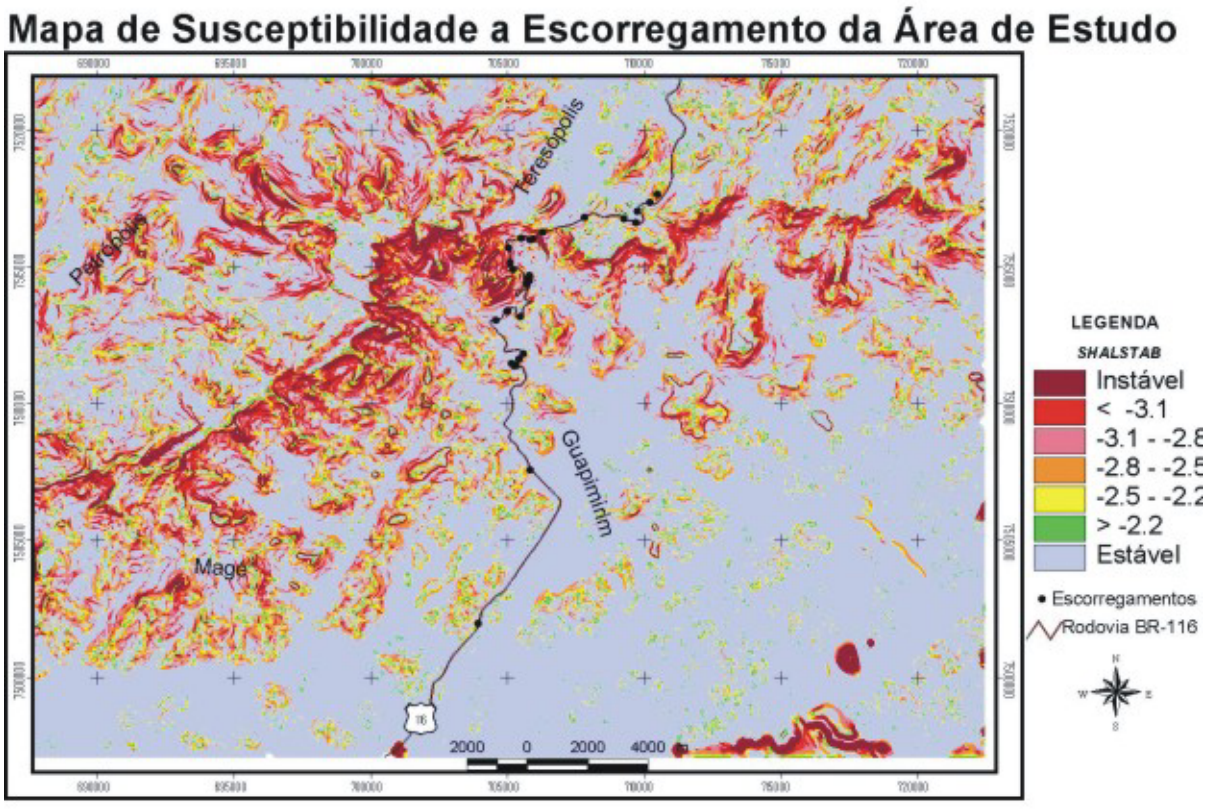

Figura 7 –Mapa de susceptibilidade com os pontos onde houve escorregamentos ao longo da BR-116.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Modelagem Matemática, em bases físicas, integrada aos Sistemas de Informações Geográficas é uma importante ferramenta de apoio nas tomadas de decisões, pois este tipo de metodologia se baseia nas leis físicas inerentes da natureza, diminuindo cada vez mais a

subjetividade nos resultados. Assim, estas metodologias têm apresentado resultados satisfatórios, pois não delega às técnicas de SIG o poder de decisão, como por exemplo, o de definir as áreas susceptíveis à ocorrência de escorregamentos rasos. A decisão é comandada pela modelagem matemática, onde o SIG é apenas uma ferramenta para a elaboração do mapa por intermédio das informações produzidas pelo modelo.

A aplicação do modelo SHALSTAB, apesar do pouco número de variáveis utilizados para predição dos escorregamentos e não considerando muitos parâmetros de engenharia de transporte para implantação de estradas, mostrou ser uma ferramenta bastante poderosa porque quase todos os escorregamentos cadastrados às margens da rodovia estão inseridos nas classes de susceptibilidade preditas pelo modelo. Desta forma, esta metodologia pode contribuir para nortear, nas rodovias já implantadas, ações mitigadoras como obras de contenção de encosta e modificação de traçados em áreas críticas. Além disso pode também, juntamente com outros mapeamentos como: geotécnico, pedológico, geológico, entre outros, subsidiar os estudos de planejamento na definição do melhor traçado.

Portanto, é de extrema importância que nos trabalhos de planejamento territorial e de implantação de novos traçados se apliquem metodologias que agregam modelos matemáticos a SIG´s, pois isso pode possibilitar a criação de cenários possíveis que se deseja alcançar, minimizando os impactos ambientais e os enormes custos financeiros ao longo do tempo, que hoje são gastos para remediar os problemas gerados por um planejamento deficiente.

REFERÊNCIAS

BRUNSDEN, D.; PRIOR, D. B.**Slope instability**. John Wiley, Chichester, 1984.

CHRISTOFOLETI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. Ed. Edgard Blücher Ltda, 1a ed., São Paulo, 1999. 236p.

De CAMPOS, J. L. E.; VARGAS JR., E. A.; CAMPOS, T. M. P. Avaliação de campo da permeabilidade não-saturada de solos em encostas. I COBRAE - Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, v.1, pp.371-382, 1992.

De CAMPOS, T. M. P.; Carvalho, A. C. M. G.; VARGAS Jr., E. A. Determinação do coeficiente de difusão em solos não saturados: proposta de uma metodologia experimental. III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados (ÑSAT'97), Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, v.1, p.231-241, 1997.

DE PLOEY, J.; CRUZ, O. Landslides in the Serra do Mar, Brazil**. Catena**, v.6, p.111-122, 1979.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potencial. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), Technical Report, 29p. 1998.

EPIA. Estudos e Projetos de Integração Ambental. TOMO I, Estudo de Impacto Ambiental - EIA. Rio de Janeiro, 2003.

ESRI. **Understanding GIS – The ARC/INFO method**. Enviromental Systems Research Institute, Wiley, New York, 1993. 535p.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T., CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia e meio ambiente**, Rio de Janeiro, Ed. Bertrand, 1996, p.123-194.

FREDRIKSEN, R. L. Erosion and Sedimentation. Following Road Construction and Timber Harvest on Unstable Soils in three small western Oregon Watersheds. USDA Forest Service Research Paper , 1970.

GOODLAND, D. R. The environmental implications of major projects in third world development. In: CLESTER, P. (Org.). **Major project and the environment**. Oxford: Major Projects Association, 1989, p.9-34.

GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. M.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, v.69, n.1-2, p.99-108, 2003.

LARSEN, M. C.; PARKS, J. E. How wide is road? The association of roads and mass-wasting in a forested montane environment. **Earth Surface Processes and Lansforms**, v.22, p 835-848, 1997.

LARSEN, M. C.;TORRES-SANCHEZ, A. J. The frequency and distribution of recent landslides in three montane tropical regions of Puerto Rico. **Geomorphology**, v.24, p.309-331, 1998.

LISBOA, M. V. **Contribuição para a tomada de decisão na classificação e seleção de alternativas de traçado para rodovias em trechos urbanizados**. POLI-USP, São Paulo, 2002.

MCCORMACK, S. Agents of change**. World Highways**, v.10, n.3, p.32-34, 2001.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, Política Ambiental do Ministério dos Transportes, Brasília, 2002, p.110.

MONTGOMERY, D. R. Road surface drainage, channel initiation, and slope stability. **Water Resources Research**, v.30, n.6, p.1925-1932, 1994.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v.30, p.1153-1171, 1994.

O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, v.22, p.794-804, 1986.

REIS, J. L. B. C. Licenciamento ambiental. I Seminário Nacional: A Variável Ambiental em Obras Rodoviárias, Foz do Iguaçu**. Anais...**, Foz do Iguaçu, FUPEF, p.185-194, 1999.

SILVA FILHO, E. P. **Movimentos de massa na vertente sul florestada do Maciço da Tijuca: Casos de Fevereirio/1988 nas Estradas Dona Castorina e Vista Chinesa.** Tese de Mestrado, Departamento de Geografia (UFRJ), Rio de Janeiro, 1992. 227p.